

EVALUACIÓN REGIONAL DE INESTABILIDADES DE LADERA INDUCIDAS POR TERREMOTOS PARA DIFERENTES ESCENARIOS SÍSMICOS EN SIERRA NEVADA (GRANADA, SE ESPAÑA)

Martín Jesús Rodríguez-Peces¹, Julián García-Mayordomo² y José Miguel Azañón^{1,3}

¹ Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada, C/Fuentenueva s/n. 18002. Granada. Email: marpeces@ugr.es

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME). C/La Calera, 1. 28760. Tres Cantos (Madrid). Email: julian.garcia@igme.es

³ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (Universidad de Granada-CSIC), Granada. Email: jazonon@ugr.es

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado una evaluación regional de inestabilidades de ladera inducidas por terremotos en Sierra Nevada (SE de España) considerando la ocurrencia de escenarios sísmicos (probabilista, pseudo-probabilista y determinista) y teniendo en cuenta los efectos de amplificación sísmica de suelo y topográfico. La Cuenca de Granada y Sierra Nevada representan una de las zonas con mayor actividad sísmica en el sur de España. En este área se han producido inestabilidades de ladera (desprendimientos y deslizamientos) relacionados con importantes terremotos (e.g. 1884 Arenas del Rey). Se ha empleado el método del “bloque rígido deslizante” de Newmark en un sistema de información geográfica. Los mapas de desplazamiento de Newmark (D_N) indican que la mayoría de los desprendimientos se localizan en áreas con D_N menores de 2 cm. Los deslizamientos ocurrirían con D_N de 2 ó más centímetros. Esta situación se daría con la ocurrencia de un terremoto grande ($M_w > 6.0$).

1. INTRODUCCIÓN

En 1965, el Ingeniero Civil N.M. Newmark ideó un sencillo método para estimar el desplazamiento permanente producido por un movimiento sísmico en presas de tierras

(Newmark, 1965). Éste método, con ligeras variaciones, fue posteriormente aplicado con éxito al estudio de laderas naturales (Wilson y Keefer, 1983). Actualmente, es común la aplicación del método de Newmark mediante un SIG para estimar a nivel regional la ocurrencia de inestabilidades de ladera por efecto sísmico (e.g. Jibson et al., 2000; Luzi et al., 2000; Romeo, 2000; Refine y Capalonga, 2002; Carro et al. 2003; Murphy y Mankelow, 2004). Sin embargo, existen muy pocos estudios que aborden esta problemática en España (e.g. García-Mayordomo, 1999; Mulas et al., 2003; Delgado et al., 2006).

El método de Newmark (1965) establece que, dada una ladera con factor de seguridad conocido, la aceleración crítica que produce desplazamiento permanente es:

$$a_c = (FS - 1) g \sin(\alpha) \quad (1)$$

donde a_c es la aceleración crítica, en unidades g, g es la aceleración de la gravedad, FS es el factor de seguridad estático y α es el ángulo del talud. Conocida ésta, el desplazamiento permanente, o desplazamiento de Newmark (D_N), se estima a partir de un acelerograma representativo del movimiento en el emplazamiento. Sin embargo, para aplicar el método de Newmark a escala regional es más conveniente emplear ecuaciones de regresión del D_N con parámetros del movimiento del suelo tales como la Intensidad de Arias o la aceleración sísmica de pico (PGA, *Peak Ground Acceleration*) (cf. Jibson, 2007).

El objetivo principal de este trabajo es presentar la aplicación a escala regional del método de Newmark en un SIG (ArcGIS) considerando diferentes escenarios sísmicos y, en particular, teniendo en cuenta los efectos de amplificación sísmica relacionados con el tipo de suelo y con la topografía. Para ello se ha seleccionado el territorio ocupado por Sierra Nevada (SE España) donde existe un notable nivel de actividad sísmica (López Casado et al., 2001) y se localizan algunas de las fallas activas con mayor potencial sísmico en España (Sanz de Galdeano et al., 2003). Esta sismicidad ha generado importantes inestabilidades de ladera (desprendimientos y deslizamientos) en las proximidades de Sierra Nevada y la Cuenca de Granada (IGME y Diputación de Granada, 2007).

La Figura 1 representa un mapa geológico del sureste de España en el que se muestra la localización de Sierra Nevada. Por motivos de espacio en este artículo se ha limitado la zona de estudio al sector occidental de Sierra Nevada.

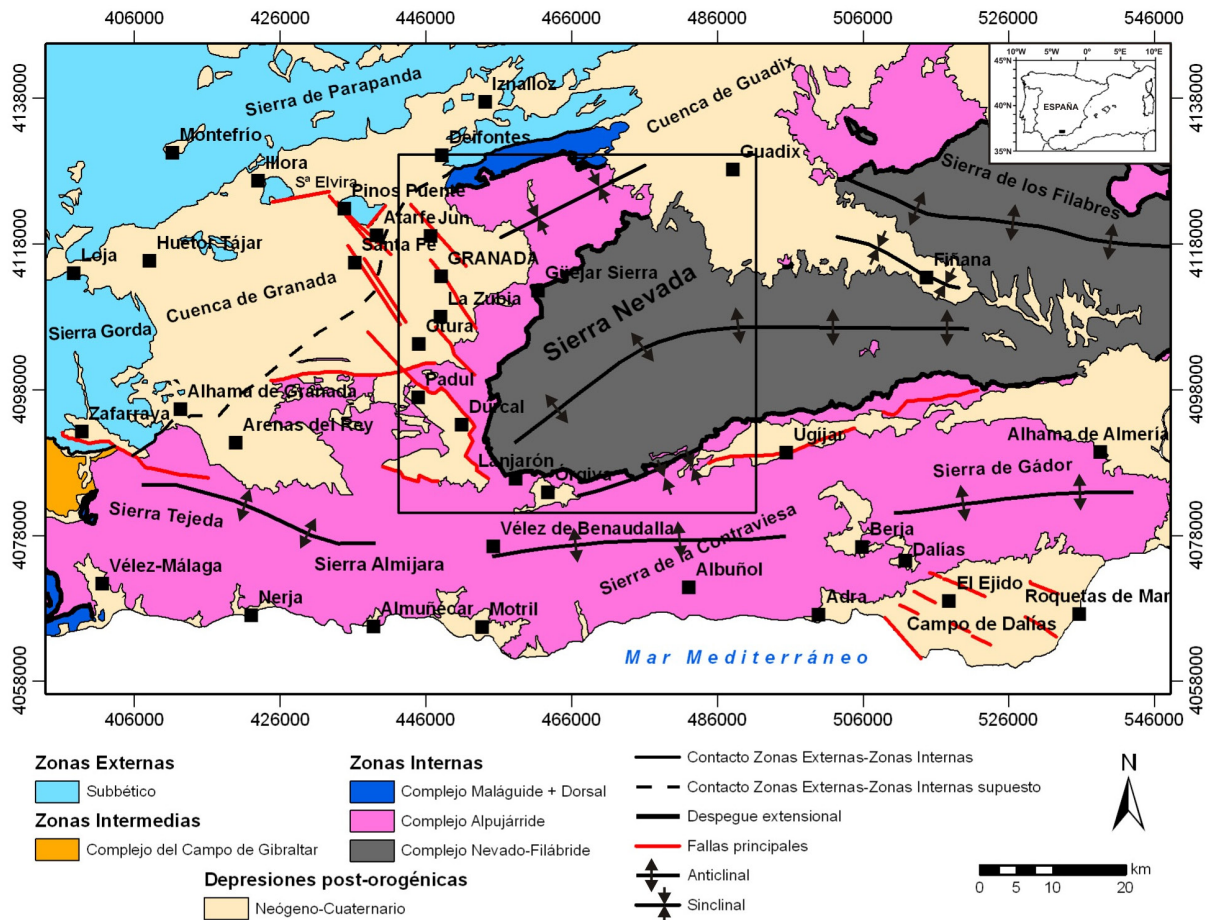


Figura 1. Mapa geológico simplificado del sector central de la Cordillera Bética en el que se muestra la extensión de los afloramientos de cada una de las unidades diferenciadas, así como el área de estudio en el sector de Sierra Nevada. En color rojo se muestran las principales fallas del borde oriental de la Cuenca de Granada.

2. METODOLOGÍA

La elaboración de un mapa de desplazamientos de Newmark (D_N) implica, en primer lugar, la obtención de un mapa del factor de seguridad estático de las laderas que, combinado con un mapa de pendientes, permite obtener el mapa de aceleraciones críticas (a_c). Dado que la a_c es la aceleración mínima requerida para iniciar la inestabilidad, éste mapa puede considerarse un mapa de susceptibilidad sísmica al movimiento. El cálculo del factor de seguridad se realiza de acuerdo con la formulación propuesta por Jibson et al. (2000):

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \quad (2)$$

donde c' es la cohesión efectiva, ϕ' es el ángulo de rozamiento interno efectivo, α es el

ángulo del talud, γ es el peso específico del material del talud, γ_w es el peso específico del agua, t es el espesor normal a la superficie de rotura y m es el grado de saturación de la superficie de rotura.

La obtención del mapa de factores de seguridad estáticos se ha realizado partiendo de la cartografía geológica digital del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a escala 1:50.000. Con base en estos mapas, se elaboró un mapa litológico, donde cada unidad estaba caracterizada por sus parámetros resistentes (peso específico, cohesión y ángulo de fricción). Estos datos se tomaron de bibliografía geotécnica, así como de algunos ensayos geotécnicos. Debido a que los rangos de valores eran muy amplios, se procedió a calcular el factor de seguridad iterando dentro de los rangos de cohesión y ángulo de fricción posibles dentro de cada grupo litológico hasta que se obtuvo un mapa con factores de seguridad mayores de 1. En la Tabla 1 se muestra los valores de los parámetros resistentes resultantes de este análisis y que finalmente han sido adoptados en los cálculos subsiguientes, así como los rangos iniciales de variación de los mismos.

	GRUPO LITOLÓGICO	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)	COHESIÓN (t/m ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
ROCA DURA	Micaesquistos, cuarcitas y gneises	2,7 (2,5-2,9)	4,6 (0-7,5)	29 (25-33)
	Filitas, cuarcitas, areniscas y conglomerados	2,5 (2,3-2,7)	4,3 (0-4,8)	28 (23-33)
	Calizas, dolomías y mármoles	2,5 (2,3-2,7)	4,5 (0-10,8)	30 (21-39)
	Calcarenitas, calizas margosas y margas	2,4 (2,2-2,6)	3,6 (0-6,1)	28 (18-38)
ROCA BLANDA	Arcillas, margas, areniscas y yesos	2,1 (1,8-2,4)	2,5 (3,5-11,7)	26 (22-30)
	Margas y margocalizas	2,1 (1,7-2,5)	2,9 (0-11,9)	29 (21-39)
	Conglomerados, arenas y arcillas	2,2 (2,0-2,4)	2,3 (0,4-1,6)	33 (27-39)
	Yesos y margas	2,2 (2,0-2,4)	1,7 (0-11,5)	28 (23-35)
SUELO	Arcillas margosas	1,9 (1,7-2,1)	1,7 (0-7,8)	18 (13-23)
	Gravas, arenas y arcillas	2,0 (1,8-2,2)	1,9 (0-3,2)	32 (26-38)
	Arcillas, limos y conglomerados	1,9 (1,7-2,1)	1,3 (2,2-5,8)	23 (17-29)

Tabla 1. Grupos litológicos y valores de parámetros resistentes finalmente considerados en el cálculo del factor de seguridad. Entre paréntesis, se muestran los rangos iniciales de variación de los parámetros resistentes.

Posteriormente, se computó el mapa litológico con el mapa de pendientes obtenido a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE), y se obtuvo el mapa de factores de seguridad (fig. 2A). La Cuenca de Granada presenta un clima árido donde los niveles freáticos se localizan en general a profundidades mayores de 20 m (IGME y Diputación de Granada, 2007). Por ello, se ha optado por considerar que la superficie de rotura se encuentra en condiciones secas ($m=0$). Además se ha establecido que la profundidad de la superficie de rotura es de 3 m. Se ha seleccionado este valor debido a que las inestabilidades de ladera más frecuentes en la zona de estudio son de pequeño tamaño

(bloques de 1 a 6 m y superficies de alteración de 1 a 3 m de profundidad), siendo en su mayoría desprendimientos y deslizamientos de pequeña magnitud. Además, si se consideran profundidades de rotura mayores a 3 m se obtienen mapas de desplazamientos de Newmark muy pesimistas que no se corresponden con la realidad observada en el campo. Finalmente, el mapa de aceleración crítica (fig. 2B) se construyó combinando el mapa de factor de seguridad con el mapa de pendientes de acuerdo con la ecuación (1).

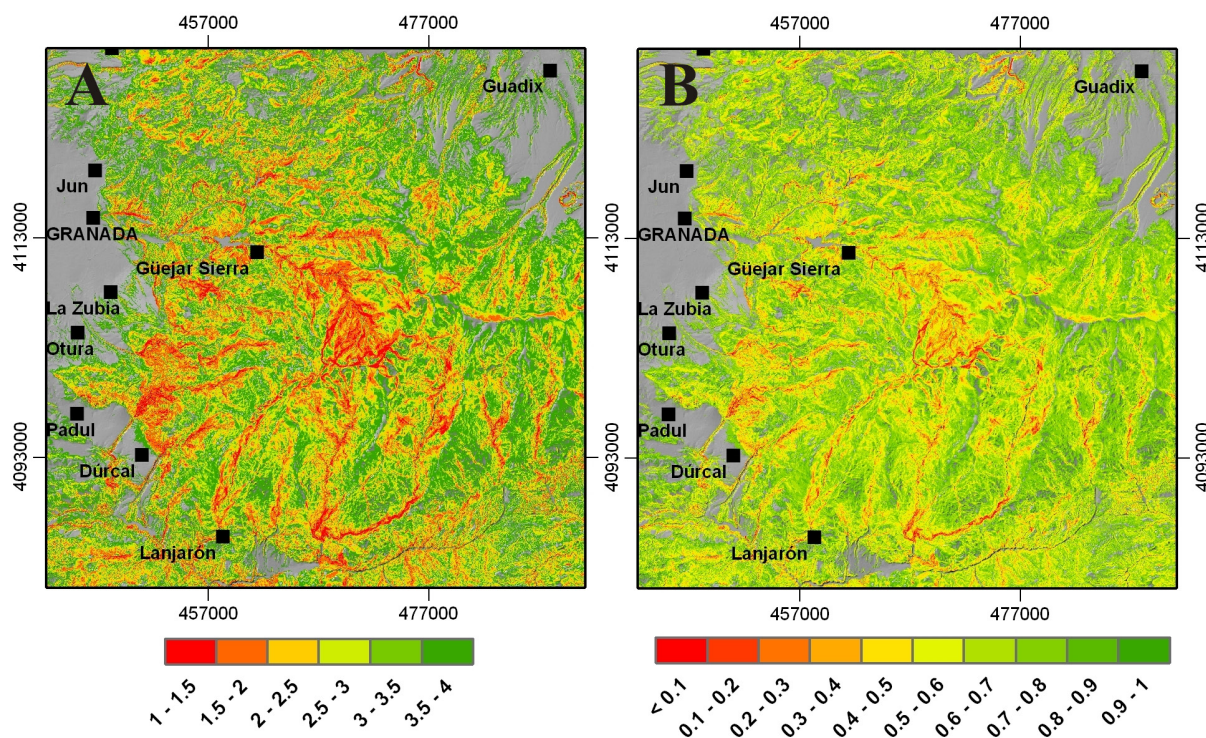


Figura 2. A: Mapa de factor de seguridad (FS) para el sector occidental de Sierra Nevada. Las áreas rojas muestran los valores más bajos. B: Mapa de aceleración crítica en unidades g ($1g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Las áreas rojas se corresponden con las zonas más susceptibles ante el movimiento sísmico.

3. ESCENARIOS SÍSMICOS

La estimación del desplazamiento de Newmark se ha realizado considerando tres diferentes escenarios sísmicos: probabilista, pseudo-probabilista y determinista.

Los escenarios sísmicos probabilistas se basan en el cálculo de mapas de peligrosidad sísmica en términos de aceleración sísmica máxima (PGA) en roca para periodos de retorno (PR) de 500 y 1000 años. Estos periodos de retorno son equivalentes a decir que la probabilidad de que se exceda la PGA es del 9.5% y 4.9% en 50 años, respectivamente. Estos mapas se han obtenido a partir de los valores de aceleración sísmica básica aportados por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02, 2002).

El escenario sísmico pseudo-probabilista se ha elaborado sobre la base del estudio de desagregación de la peligrosidad sísmica en Granada de Peláez y López Casado (2001). En este trabajo se concluye que el terremoto más probable para un periodo de retorno de 975 años es de $M_w=6,3$ a una distancia epicentral de 15 km. Hemos utilizado estos resultados para elaborar un escenario sísmico conservador que considera la ocurrencia de un terremoto de $M_w=6,3$ en cualquier punto del área de estudio.

Los escenarios sísmicos deterministas se han realizado sobre la base de la potencial rotura de algunas de las fallas activas presentes en la zona (Sanz de Galdeano et al., 2003). En este trabajo se ha seleccionado la Falla de Granada, una de las fallas con mayor potencial sísmico en la zona (Fig. 4). Se ha modelizado la ocurrencia de un terremoto de $M_w=6,6$ con epicentro variable a lo largo de la traza de la falla y se ha calculado la PGA en roca que se produciría en función de la distancia a la falla mediante la ecuación de atenuación de Sabetta y Pugliese (1996).

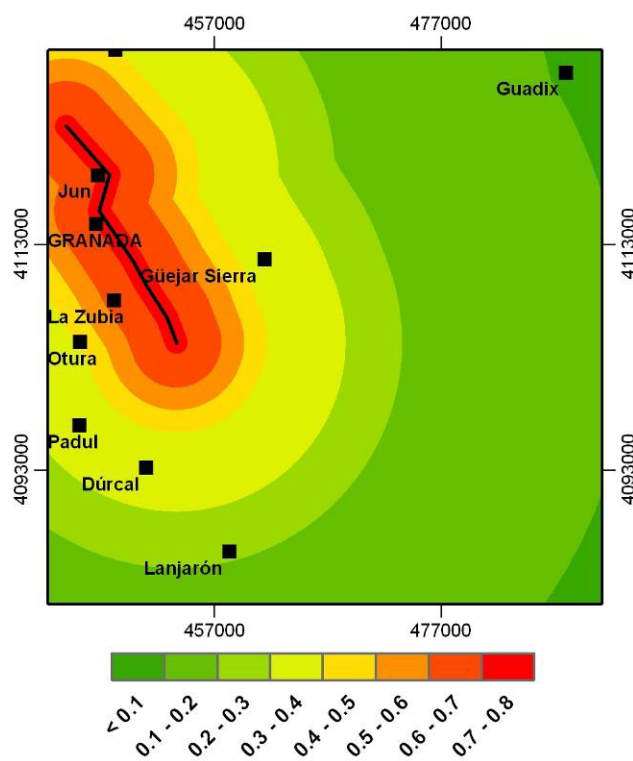


Figura 4. Mapa determinista de aceleración sísmica máxima (PGA) en roca para la rotura de la Falla de Granada ($M_w=6,6$) (unidades g, $1g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Los mapas de peligrosidad de los otros escenarios sísmicos considerados pueden encontrarse en Rodríguez-Peces (2008).

4. EFECTOS DE AMPLIFICACIÓN SÍSMICA

Los mapas de peligrosidad sísmica de los escenarios sísmicos considerados han sido calculados para PGA en condiciones de roca. Sin embargo, la vibración sísmica experimentada en el terreno depende, por una parte, de la rigidez de los materiales sedimentarios que se disponen encima del basamento rocoso (efecto suelo) y, por otra, de las condiciones topográficas locales (efecto topográfico). En el primer caso se ha multiplicado la PGA en roca por un factor de amplificación variable según el grupo litológico considerado (Fig. 5A). Este factor de amplificación se ha adaptado de los resultados obtenidos en el Proyecto RISMUR (Benito et al., 2006). En el segundo caso, se ha implementado una herramienta de cálculo en el SIG con base en las recomendaciones del Eurocódigo-8 (CEN, 2004). En concreto, el factor de amplificación topográfico ha sido evaluado computando la pendiente y la altura relativa de las crestas montañosas, distinguiéndose tres casos básicos (Fig. 5B): (a) pendientes menores de 15° o relieves con altura relativa menor de 30 m: no se considera la amplificación topográfica (factor de amplificación = 1.0), (b) pendientes entre 15° y 30° y con una altura relativa de más de 30 m: factor de amplificación = 1.2 y (c) pendientes mayores de 30° y con una altura relativa de más de 30 m: factor de amplificación = 1.4.

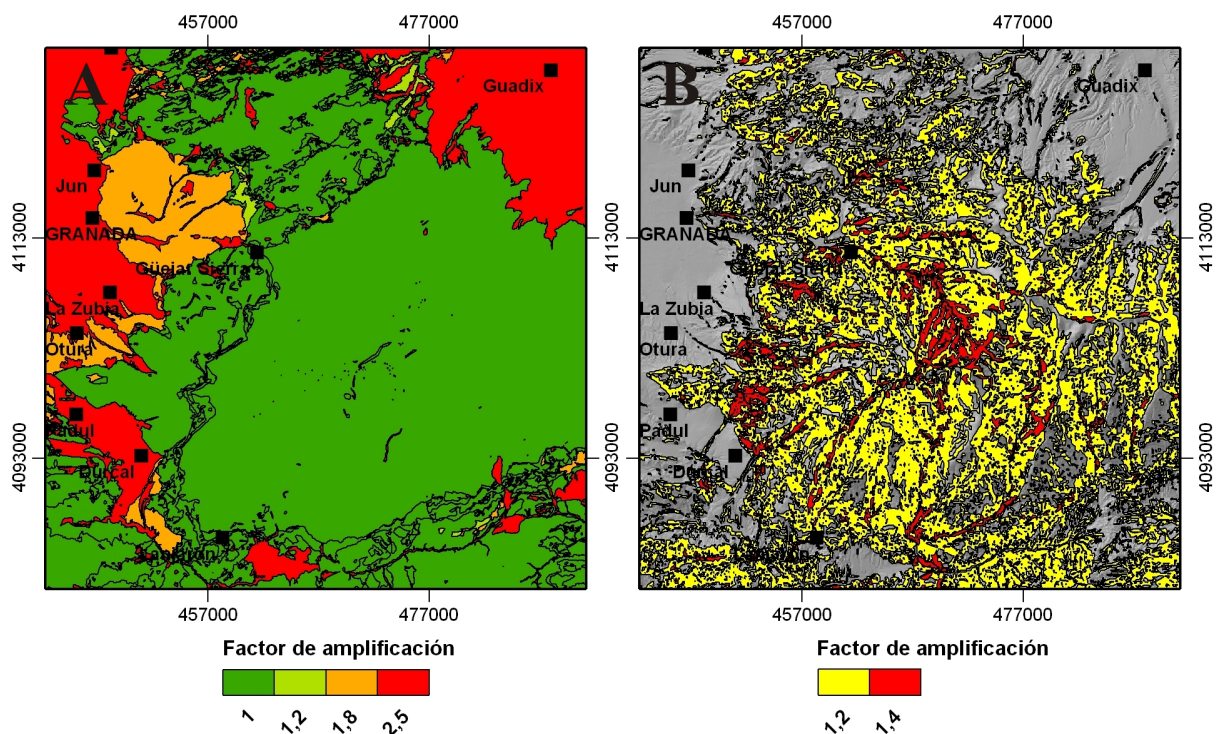


Figura 5. Mapas de amplificación sísmica para el sector occidental de Sierra Nevada. A: Amplificación en función del tipo de suelo. B: Amplificación topográfica.

5. OBTENCIÓN DE LOS MAPAS DE DESPLAZAMIENTO DE NEWMARK

Finalmente, los mapas de desplazamiento de Newmark se han calculado considerando la ecuación de regresión de Jibson (2007):

$$\log D_N = 0.215 + \log \left[\left(1 - \frac{a_c}{PGA} \right)^{2.341} \left(\frac{a_c}{PGA} \right)^{-1.438} \right] \quad (3)$$

donde D_N es el desplazamiento de Newmark (en centímetros), a_c es la aceleración crítica y PGA es la aceleración máxima. Existen en la bibliografía diferentes ecuaciones de regresión que relacionan D_N con otros parámetros, como la Intensidad de Arias (Romeo, 2000; Jibson, 2007). Se ha realizado una comparativa de estas ecuaciones con el fin de seleccionar la que proporcione mejores resultados. Se ha seleccionado la ecuación (3) en función del cociente de aceleración crítica y PGA puesto que está elaborada con numerosos registros sísmicos con magnitudes equivalentes a las consideradas en este trabajo y además presenta una correlación estadística relativamente alta ($R^2=84\%$).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes escenarios considerados. También se indica la localización de inestabilidades de ladera identificadas en campo (IGME y Diputación de Granada, 2007).

Para los escenarios probabilistas los desplazamientos de Newmark obtenidos presentan valores muy bajos. La mayoría son menores de 2 cm, aunque en algunos puntos pueden ser mayores de 5 cm (Fig. 6). Los desplazamientos de Newmark se distribuyen espacialmente en áreas dispersas de pequeño tamaño, las cuales van expandiéndose al aumentar el periodo de retorno considerado. La presencia de la mayoría de estos desplazamientos se debe a que el fuerte encajamiento de los ríos presentes en Sierra Nevada provoca que estas zonas presenten una pendiente muy alta y valores bajos de factor de seguridad estático y de aceleración crítica (Fig. 2). Además, la elevada pendiente favorece una importante amplificación topográfica (fig. 5B) que influye notablemente en la generación de desplazamientos.

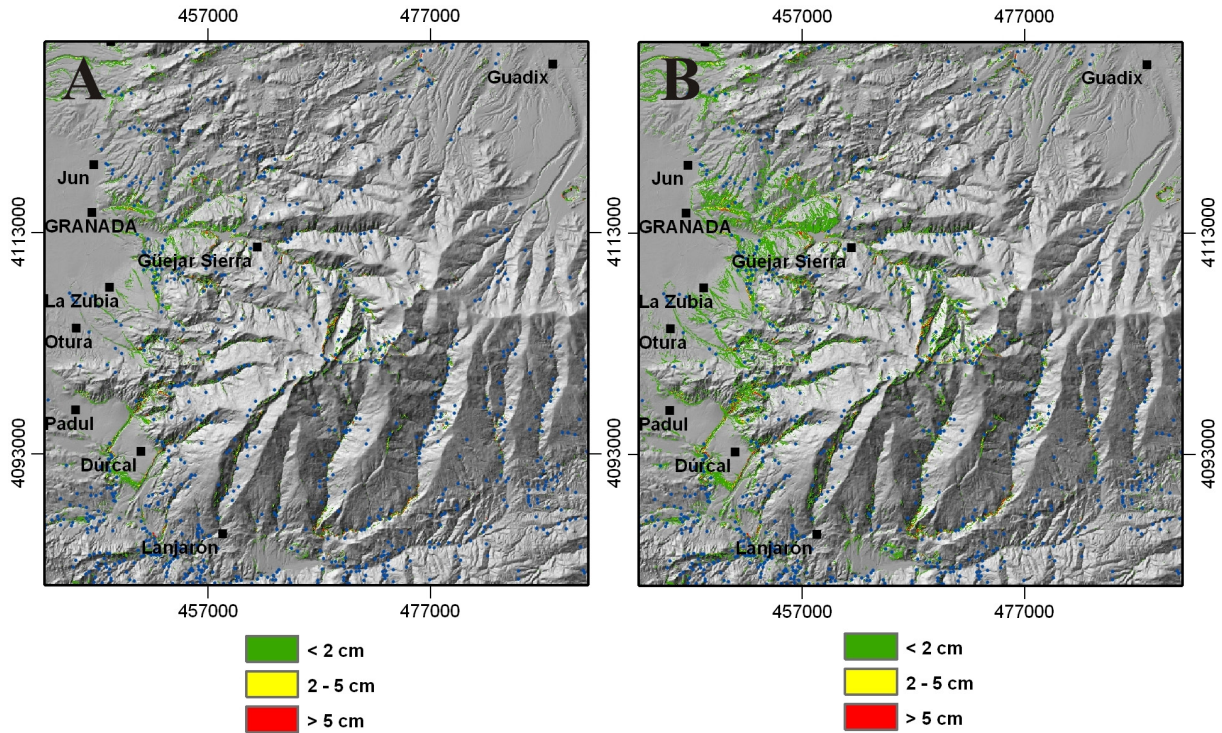


Figura 6. Mapas probabilistas de desplazamientos de Newmark para el sector occidental de Sierra Nevada. A: Periodo de retorno de 500 años B: Periodo de retorno de 1000 años.

Los desplazamientos de Newmark más elevados se producen con los escenarios deterministas del terremoto más probable para PR 975 años ($M_w=6.3$) y los correspondientes a la rotura de las fallas consideradas (Fig. 7). En estos casos, los valores obtenidos son, con mucha frecuencia, mayores de 2 cm y, localmente, mayores de 5 cm. Además, se distribuyen en áreas mucho más extensas, sobre todo en las laderas generadas por el encajamiento de la red de drenaje.

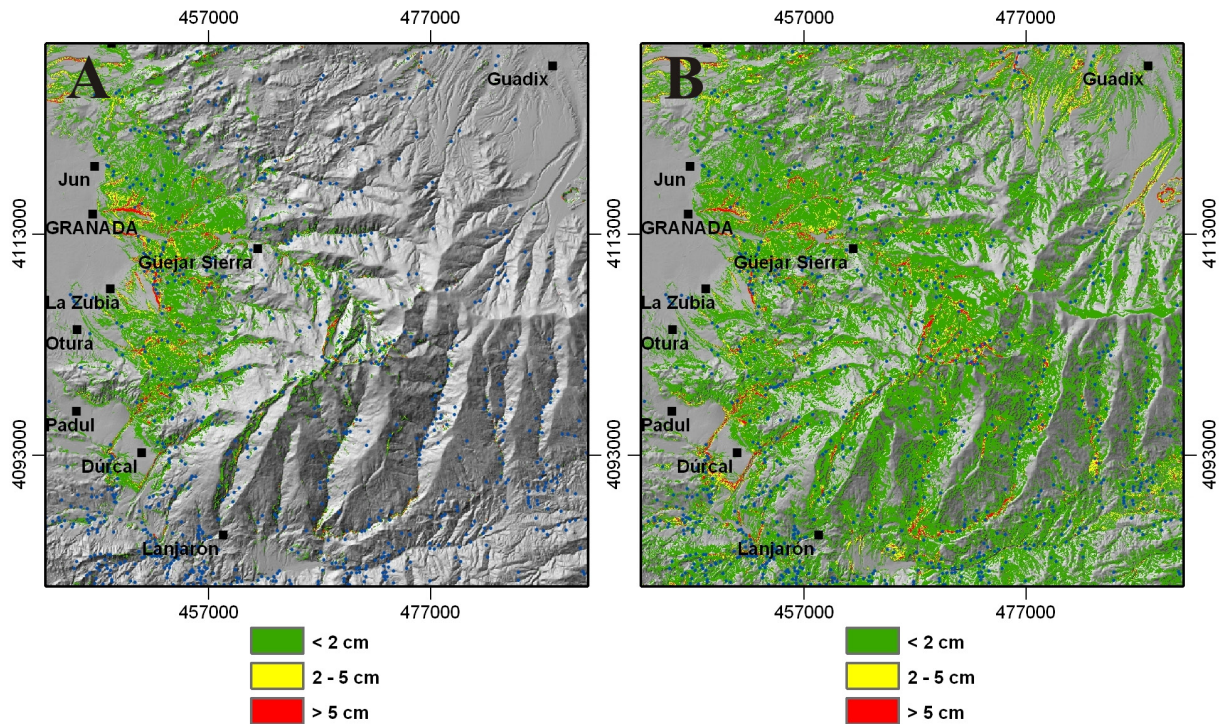


Figura 7. Mapas deterministas de desplazamientos de Newmark para en el sector occidental de Sierra Nevada. A: Rotura completa de la Falla de Granada ($M_w=6.6$). B: Ocurrencia del terremoto más probable para periodo de retorno de 975 años ($M_w=6.3$).

Los desplazamientos de Newmark obtenidos deben considerarse como un índice de inestabilidad potencial. Desplazamientos superiores a 5 cm implican potencialmente la aparición de deslizamientos, mientras que desplazamientos inferiores son característicos de desprendimientos (cf. Romeo, 2000). En cualquier caso, dado que estos valores pueden tener una dependencia muy fuerte según las características del territorio estudiado y de los materiales considerados, es necesario contrastarlos con datos locales de campo.

La correspondencia entre los desplazamientos de Newmark obtenidos y los deslizamientos de gran tamaño descritos en trabajos previos (IGME y Diputación de Granada, 2007) es bastante limitada. Esto se debe a que, en general, estos deslizamientos se localizan en el interior de Sierra Nevada donde el fuerte encajamiento de la red de drenaje provoca situaciones de inestabilidad de las laderas de los cauces fluviales. No obstante, existen algunos casos en los que se observan desplazamientos de Newmark en las cabeceras de estos grandes deslizamientos. Esto sugiere que la sismicidad puede contribuir a la reactivación de estos deslizamientos, así como provocar la generación de nuevos deslizamientos.

7. CONCLUSIONES

La metodología de Newmark, implementada mediante un SIG, se revela como una técnica sencilla y relativamente fiable para evaluar a nivel regional la susceptibilidad y peligrosidad de las laderas a inestabilidades producidas por terremotos.

La correspondencia entre los desplazamientos de Newmark obtenidos y los deslizamientos de gran tamaño descritos en trabajos previos es bastante limitada. Esto se debe a que, en general, estos deslizamientos se localizan en el interior de Sierra Nevada donde el fuerte encajamiento de la red de drenaje provoca situaciones de inestabilidad de las laderas de los cauces fluviales. No obstante, existen algunos casos en los que se observan desplazamientos de Newmark en las cabeceras de estos grandes deslizamientos. Esto sugiere que la sismicidad puede contribuir a la reactivación de estos deslizamientos, así como provocar la generación de nuevos deslizamientos.

De acuerdo con los resultados alcanzados en este estudio, las inestabilidades de laderas inducidas por terremotos futuros en Sierra Nevada serán fundamentalmente de tipo desprendimiento y avalanchas rocosas. Estas inestabilidades de ladera ocurren en las zonas que presentan valores de desplazamiento de Newmark menores de 2 cm. Para que se produzcan inestabilidades de ladera de mayor tamaño afectando áreas más extensas, así como deslizamientos se requiere la ocurrencia de un gran terremoto ($M_w > 6.0$) asociado a la rotura de alguna de las fallas activas en el área de estudio. En este caso, estas inestabilidades de ladera se producirán en zonas con valores de desplazamiento de Newmark de 2 o más centímetros.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a los proyectos TOPOIBERIA CONSOLIDER-INGENIO2010 CSD2006-00041, MMA083/2007, CGL2008-03249/BTE y al SISMILAD del IGME.

REFERENCIAS

- Benito B., Gaspar-Escribano J.M., García-Mayordomo J., Jiménez M.E., García Rodríguez, M.J., 2006. *Proyecto RISMUR: Evaluación de la peligrosidad sísmica*. Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia, Madrid.
- Carro, M., De Amicis, M., Luzi, L. y Marzorati, S., 2003. The application of predictive modelling techniques to landslides induced by earthquakes: the case study of the 26 September 1997 Umbria-Marche earthquake (Italy). *Engineering Geology*, 69: 139-159.
- Comité Européen de Normalisation (CEN), 2004. *Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. EN 1998-1, Bruselas.
- Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech C. y Cuenca A., 2006. Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos.

- Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (3-4): 197-218.
- García-Mayordomo, J., 1999. Zonificación Sísmica de la Cuenca de Alcoy Mediante un Sistema de Información Geográfico. *Ier Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia, 12-16 de Abril de 1999, Memorias, Tomo Ib: 443-450.
- IGME y Diputación de Granada, 2007. *Atlas de Riesgos Naturales en la provincia de Granada*. Granada, 190 pp.
- Jibson, R.W., 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91: 209-218.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. y Michael, J.A., 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58: 271-289.
- López Casado, C.; Peláez Montilla, J.A. y Henares Romero, J., 2001. Sismicidad en la Cuenca de Granada. En: *La Cuenca de Granada. Estructura, Tectónica activa, Sismicidad, Geomorfología y dataciones existentes*. Sanz de Galdeano, C.; Peláez Montilla, J.A. y López Garrido. A.C. (Editores), CSIC-Universidad de Granada: 148-157.
- Luzi, L., Pergalani, F. y Terlien, M.T.J., 2000. Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology*, 58: 313-336.
- Mulas, J., Ponce de León, D. y Reoyo, E., 2003. Microzonación sísmica de movimientos de ladera en una zona del Pirineo Central. *2º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 13-26.
- Murphy, W. y Mankelaw, J.H., 2004. Obtaining probabilistic estimates of displacements on a landslide during future earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, 8: 133-157.
- NCSE-02, 2002. *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación*. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. B.O.E. de 11 de octubre de 2002 (35898-35967).
- Newmark, N.M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Géotechnique*, 15: 139-160.
- Peláez Montilla, J.A y López Casado, C., 2001. Peligrosidad sísmica en la Cuenca de Granada. En: *La Cuenca de Granada. Estructura, Tectónica activa, Sismicidad, Geomorfología y dataciones existentes*. Sanz de Galdeano, C.; Peláez Montilla, J.A. y López Garrido. A.C. (Editores), CSIC-Universidad de Granada: 175-188.
- Refine, A. y Capalongo, D., 2002. Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake induced landslide hazard assessment. *Computers & Geosciences*, 28: 735-749.
- Rodríguez Peces, M.J., 2008. *Evaluación regional de inestabilidades de ladera por efecto sísmico: Mapas de desplazamiento de Newmark para la Cuenca de Lorca, Cuenca de Granada y Sierra Nevada*. Tesis de Máster en Geología, Universidad de Granada (España), 254 pp.
- Romeo, R., 2000. Seismically induced landslide displacements: a predictive model. *Engineering Geology*, 58: 337-351.
- Sabetta, F. y Pugliese, A., 1996. Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (2): 337-352.
- Sanz de Galdeano, C.; Peláez Montilla, J.A. y López Casado, C., 2003. Seismic Potential of the Main Active Faults in the Granada Basin (Southern Spain). *Pure and Applied Geophysics*, 160: 1537-1556.
- Wilson, R.C. y Keefer, D.K., 1983. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73: 863-877.